

УДК 523.9-1/-8

ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР НА ФАЗЕ РОСТА 23-го ЦИКЛА

© 2020 г. И. А. Биленко^{1, *}, К. С. Тавастшерна²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), г. Москва, Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН),
г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: bilenko@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 16.02.2019 г.

После доработки 21.01.2020 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

Исследованы закономерности формирования корональных дыр на фазе роста 23-го цикла. Детально рассмотрен период с 01.01.1997 г. по 01.03.2000 г. (Кэррингтоновские обороты 1918–2059). Проанализирована эволюция глобального магнитного поля Солнца от зональной структуры распределения магнитных полей к секторной. Показано, что зональная структура является квазистабильной. Сумма зональных гармоник доминирует до 1941-го Кэррингтоновского оборота, хотя с оборота 1932-го формируется устойчивая четырехсекторная структура глобального магнитного поля. В 1941–1950-м Кэррингтоновских оборотах вклад зональных и секторных компонент становится приблизительно одинаков, а начиная с Кэррингтоновского оборота 1950 доминирует секторная структура глобального магнитного поля. Секторная структура претерпевает резкие изменения от четырехсекторной в начале роста секторных гармоник (с Кэррингтоновского оборота 1926) к двухсекторной, затем снова к четырехсекторной и далее опять к двухсекторной. Корональные дыры однозначно трассируют все эволюционные изменения глобального магнитного поля. Структура полярности глобального магнитного поля однозначно определяет зоны фотосферных магнитных полей, где формируются корональные дыры.

DOI: 10.31857/S0016794020040021

1. ВВЕДЕНИЕ

Корональные дыры (КД) являются одним из важнейших факторов, определяющих космическую погоду и влияющих на геомагнитную активность. Происхождение как высокоскоростных, так и низкоскоростных потоков солнечного ветра связано с КД [Nolte et al., 1976; Sheeley and Harvey, 1981; Temmer et al., 2007]. КД наблюдаются на разных уровнях в солнечной атмосфере. На изображениях короны в крайнем ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах они видны как области с пониженной яркостью, а по данным наблюдений в хромосферной линии He I 10830 Å они проявляются как зоны повышенной яркости [Harvey and Sheeley, 1979; Kahler et al., 1983]. В ряде исследований было установлено, что КД располагаются в областях с доминированием одной полярности [Harvey et al., 1982; Timothy et al., 1975; Varsic et al., 1999], хотя степень униполярности в разных частях занимаемой КД области фотосферных магнитных полей, может быть разной [Bilenko, 2005].

Известно, что динамика КД демонстрирует 11-летнюю и 22-летнюю периодичности, связанные с цикличностью солнечной активности. Различают полярные и неполярные КД. Динамика их в циклах солнечной активности во многом отличается [Bilenko and Tavastsherna, 2016]. Ikhsanov and Ivanov [1999] показали, что долгоживущие экваториальные КД имеют примерно одинаковое с солнечными пятнами дифференциальное вращение, тогда как долгоживущие полярные КД имеют твердотельное вращение. В целом КД хорошо трассируют эволюционные изменения глобального магнитного поля (ГМП) [Insley et al., 1995; Sanchez-Ibarra and Barraza-Paredes, 1992; McIntosh, 2003; Bilenko and Tavastsherna, 2016]. Как отмечено в работе Ivanov and Obridko [2014] – крупномасштабные магнитные поля играют важную роль в организации всей солнечной активности. В статье Bilenko и Tavastsherna [2017] было показано, что большинство КД формируются в периоды стабильной структуры ГМП. С ростом скорости структурных изменений ГМП число КД и значения их параметров уменьшаются. Корреляция

между площадью, протяженностью по широте и долготе, магнитному потоку КД и напряженностью ГМП выше в циклах с более высокими значениями магнитного поля и более стабильной структурой ГМП [Bilenko and Tavastsherna, 2017].

Несмотря на большое внимание, уделяемое в последнее время исследованию КД, закономерности их формирования, процессы, определяющие динамику КД в циклах, связь КД с другими явлениями солнечной активности до сих пор остаются не ясными. Поэтому исследование закономерностей формирования КД и их эволюционных изменений в циклах солнечной активности важно и для понимания физики процессов, происходящих на Солнце, и для прогнозирования космической погоды и геомагнитной активности.

Целью данной работы является детальное рассмотрение закономерностей формирования и динамики КД на фазе роста 23-го цикла, так как именно на фазе роста солнечной активности происходит резкое изменение параметров всех процессов на Солнце, что оказывает непосредственное влияние на межпланетную среду и на земную магнитосферу.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Рассматривается период с 01.01.1997 г. по 01.03.2000 г., что соответствует Кэррингтоновским оборотам (КО): 1918–2059. При сопоставлении КД с фотосферными магнитными полями, использовались данные обсерватории Китт-Пик. Границы КД, полученные по ежедневным наблюдениям в линии He I 10830 Å, накладывались на данные, также ежедневных, наблюдений фотосферных магнитных полей полного диска Солнца в линии Fe I λ = 8688 Å, а синоптические данные расположения КД – на синоптические карты магнитных полей.

При исследовании зависимости динамики КД от динамики ГМП использованы синоптические карты поля, рассчитанные в потенциальном приближении на поверхности источника (2.5 Rs), обсерватории WSO (Wilcox Solar Observatory) [Altschuler and Newkirk, 1969; Altschuler et al., 1975; Hoeksema and Scherrer, 1986; Schatten et al., 1969]. Также были использованы данные расчетов коэффициентов разложения крупномасштабного магнитного поля Солнца по сферическим составляющим обсерватории WSO.

При иллюстрации расположения КД в короне были использованы данные космической обсерватории SOHO/EIT в линии Fe XII 195 Å.

3. ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФАЗЕ РОСТА 23-го ЦИКЛА

Динамика ГМП Солнца определяется эволюционными изменениями крупномасштабных магнитных полей Солнца, определяющих и межпланетное магнитное поле. Она проявляется в поведении низкочастотных составляющих сферического разложения фотосферных магнитных полей Солнца [Бердичевская, 1987] в смене знака магнитного поля на полюсах в максимумах солнечной активности [Harvey and Recely, 2002; Bilenko, 2002]. На рисунке 1а показано изменение магнитных полей положительной и отрицательной полярности и суммы их модулей, полученные из долготной диаграммы распределения магнитных полей Солнца на поверхности источника (2.5 Rs), рассчитанной в потенциальном приближении для каждого КО за рассматриваемый период [Bilenko, 2014; Bilenko and Tavastsherna, 2016]. Тонкие линии соответствуют данным за каждый КО, а толстые – усредненным за 7 КО.

Солнечное магнитное поле может быть описано как функция широты и долготы (r, θ, φ) [Altschuler and Newkirk, 1969; Chapman and Bartels, 1940]:

$$\psi(r, \theta, \varphi) = R \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \times [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] P_n^m(\theta),$$

где: $P_n^m(\theta)$ – это присоединенные полиномы Лежандра; N – число гармоник; коэффициенты: g_n^m, h_n^m – вычисляются с помощью фитирования с методом наименьших квадратов наблюдаемой радиальной компоненты фотосферных магнитных полей в потенциальном приближении. На основе коэффициентов g_n^m, h_n^m можно получить спектр мощности различных гармонических составляющих из общего разложения глобального магнитного поля Солнца по сферическим гармоникам [Altschuler et al., 1977; Levine, 1977; Stix, 1977]:

$$S_n = \sum_{m=0}^n \left[(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2 \right].$$

Проявлением циклической эволюции ГМП является переход от зональной структуры распределения магнитных полей к секторной на фазе роста и обратная трансформация от секторной структуры распределения магнитных полей к зональной на поздних фазах спада солнечной активности. Это топологическое изменение магнитных полей имеет существенное значение, поскольку в этот период резко изменяется общий уровень солнечной активности, а также и параметры всех явлений солнечной активности. На

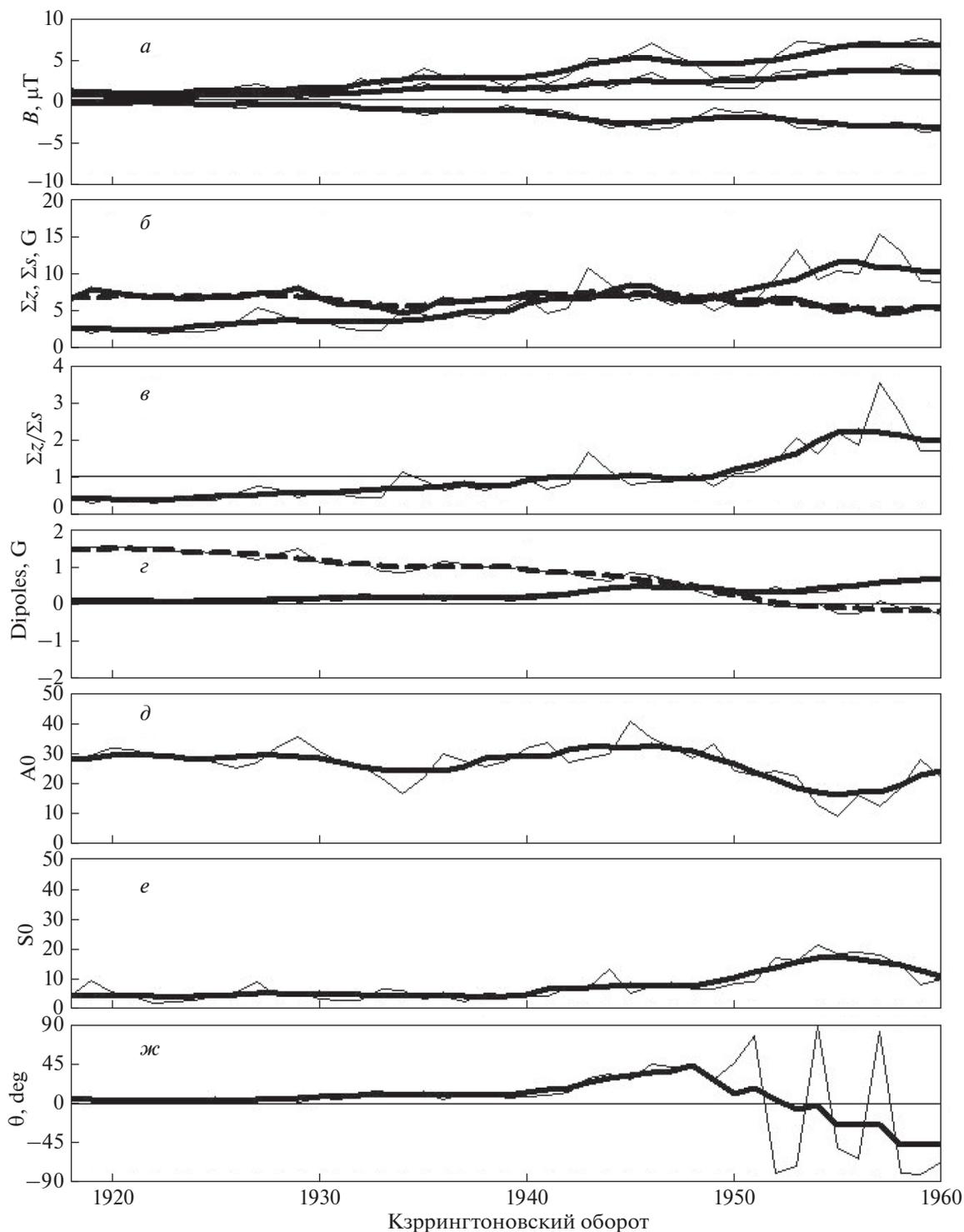


Рис. 1. *a* – Изменения магнитных полей положительной и отрицательной полярности и суммы их модулей на поверхности источника ($2.5 R_s$), рассчитанные в потенциальном приближении; *б* – изменения суммы зональных (штриховая линия) и суммы секторных гармоник (сплошная линия); *в* – отношение суммы зональных к сумме секторных гармоник; *г* – изменения осесимметричной дипольной компоненты (штриховая линия) и экваториального диполя (сплошная линия); *д* – осесимметричный и антисимметричный по отношению к экватору спектр гармоник; *е* – осесимметричный и симметричный по отношению к экватору спектр гармоник; *ж* – изменения полярного угла дипольной компоненты. Тонкие линии соответствуют данным за каждый КО, а толстые – усредненным за 7 КО.

рисунке 1б показаны изменения суммы зональных (штриховая линия) и суммы секторных гармоник (сплошная линия). Отношение их значений приведено на рис. 1в. Изменения осесимметричной дипольной компоненты (штриховая линия) и экваториального диполя (сплошная линия) показаны на рис. 1г. Осесимметричный и антисимметричный по отношению к экватору спектр гармоник показан на рис. 1д, а осесимметричный и симметричный по отношению к экватору спектр гармоник – рис. 1е. Эволюция полярного угла дипольной компоненты показана на рис. 1ж. Из рисунка 1 следует, что на фазе роста 23-го цикла с ростом магнитного поля растет вклад секторных структур ГМП, а зональных снижается. Рост уровня секторных структур начинается приблизительно в КО 1926, но до КО 1940 доминирует зональная структура ГМП (рис. 1в). В КО 1941 уровень суммы зональных и секторных гармоник становится равным по величине, а, начиная с КО 1950, доминирует уже секторная структура ГМП. Осесимметричная дипольная компонента (штриховая линия) плавно уменьшается на протяжении всей фазы роста 23-го цикла, а компонента экваториального диполя (сплошная линия) начинает медленно расти с КО 1927, примерно одновременно с ростом секторной составляющей и ростом полярного угла дипольной компоненты, и ее рост резко ускоряется начиная с КО 1941, т.е. с момента когда вклад секторных и зональных гармоник становится равным. Вклад осесимметричных и антисимметричных по отношению к экватору гармоник (рис. 1д) резко падает начиная с КО 1948, а осесимметричных и симметричных по отношению к экватору гармоник – возрастает (рис. 1е), достигая соответственно минимума и максимума примерно в КО 1955. Затем уровень осесимметричных и антисимметричных по отношению к экватору гармоник начинает расти, а осесимметричных и симметричных по отношению к экватору гармоник – снижаться. Полярный угол дипольной компоненты претерпевает резкие колебания в период КО 1949–1959.

4. ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КД НА ФАЗЕ РОСТА 23-го ЦИКЛА

КД являются хорошими трассерами циклических вариаций ГМП Солнца [Obridko and Shelting, 1989; Ikhsanov and Ivanov, 1999; Mogilevsky et al., 1997; Bilenko, 2002; Bilenko and Tavastsherna, 2016, 2017]. В минимуме солнечной активности, при зональной структуре ГМП, КД повторяют зональную структуру ГМП. На рисунке 2 приведены примеры структуры ГМП, а также распределения фотосферных магнитных полей и КД по ежедневным данным в период доминирования зональной структуры. На рисунках 2 а5, б5, в5, г5

показаны распределения ГМП, рассчитанного в потенциальном приближении на поверхности источника (2.5 Rs) для 1919, 1922, 1924 и 1929-го КО. Над ними приведены изображения полного диска Солнца в линии 195 Å по данным SOHO/EIT (а1, а2, б1, б2, в1, в2, г1, г2) и совмещенные изображения ежедневных данных фотосферных магнитных полей и КД в линии He I 10830 Å обсерватории Китт-Пик (а3, а4, б3, б4, в3, в4, г3, г4) для разных долготных интервалов. Стрелками на картах магнитного поля указаны даты приведенных ежедневных изображений КД соответственно для левых и правых изображений. Видно, что при зональной структуре наблюдаются большие КД на полюсах. Часто они имеют протяженные по широте отростки в область низких широт. Иногда эти отростки отсоединяются от полярных КД и формируют отдельные КД в той же полусфере в областях фотосферных магнитных полей той же полярности, что и магнитные поля соответствующего полюса Солнца. Известно, что практически все высокоширотные КД являются генетически связанными с соответствующими полярными КД [Bohlin, 1977]. На низких широтах формируются отдельные небольшие короткоживущие КД в областях магнитных полей с полярностью, соответствующей полярности магнитного поля на соответствующем полюсе. Зональная структура ГМП и зональное распределение КД, несмотря на кратковременные возмущения, в целом, остается стабильной на протяжении ее доминирования в минимуме цикла до КО 1941. С момента начала роста секторных гармоник (КО 1926) наблюдаются кратковременные возмущения нейтральной линии магнитного поля на поверхности источника.

С ростом активности и началом роста секторных гармоник ГМП (КО 1941) характер распределения КД также изменяется. Широтная динамика не полярных КД трассирует изменение структуры ГМП от зональной к секторной. Теперь КД одной полярности занимают протяженные по широте и долготе области [Bilenko, 2002; Bilenko and Tavastsherna, 2016]. На рисунке 3 показаны примеры различных топологий ГМП на поверхности источника при разных состояниях секторной структуры для КО 1943, 1948, 1951 и 1958 (а5, б5, в5, г5) и ежедневные изображения КД в EUV 195 Å (а1, а2, б1, б2, в1, в2, г1, г2) и линии He I 10830 Å, совмещенные с фотосферными магнитными полями (а3, а4, б3, б4, в3, в4, г3, г4). Видно, что полярные КД резко уменьшаются. Они исчезают совсем к максимуму цикла, и появляются вновь уже после смены знака ГМП. Не полярные КД, соответствующие фотосферным магнитным полям одной полярности, начинают формировать протяженные широтно-долготные КД, отражая распределение ГМП. Расположение КД в областях фотосферных магнитных полей поло-

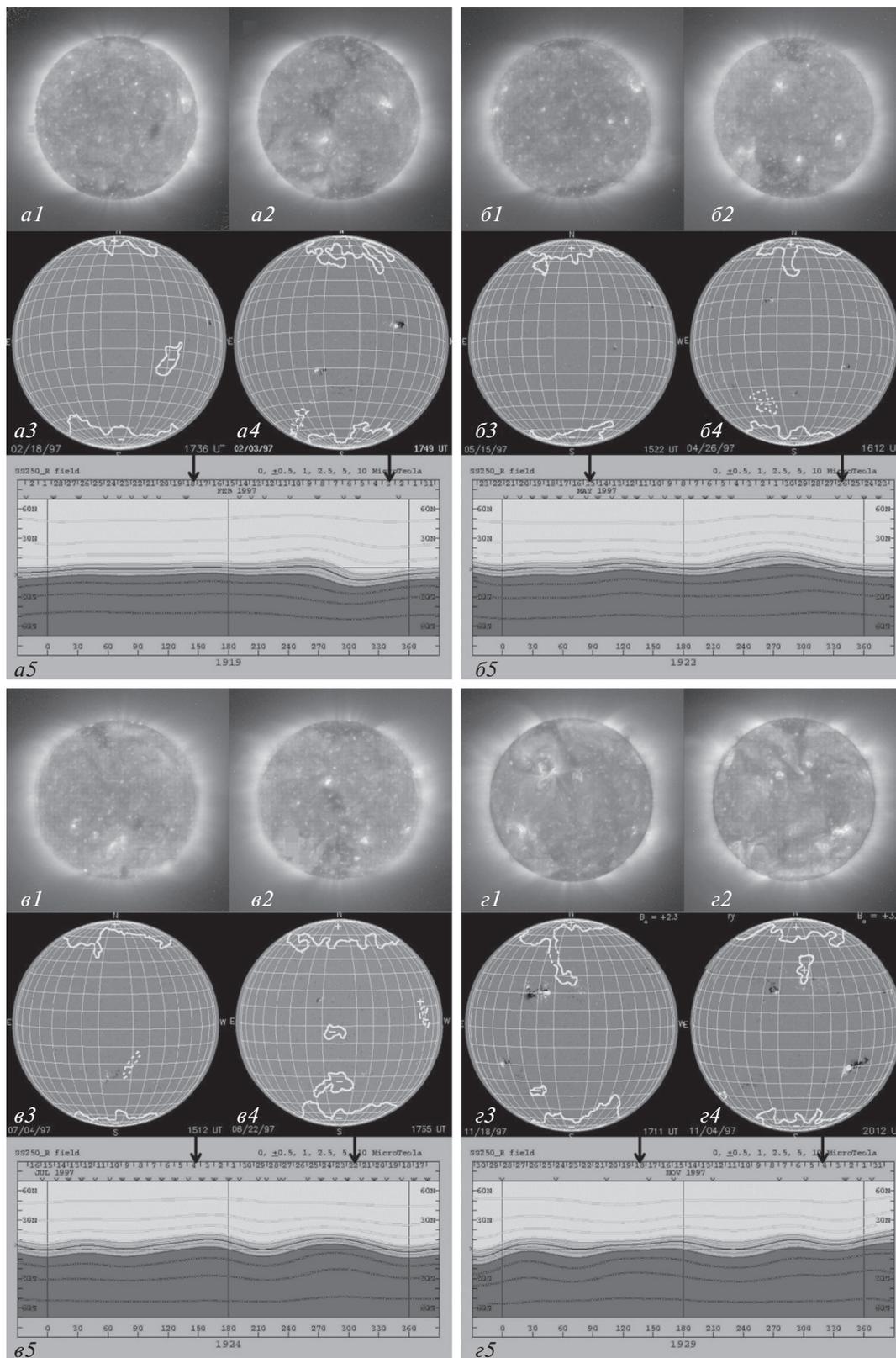


Рис. 2. Примеры зональной структуры ГМП и распределения ежедневных фотосферных магнитных полей и КД. ГМП рассчитанное в потенциальном приближении на поверхности источника (2.5 Rs) для 1919, 1922, 1924 и 1929 КО (a5, b5, v5, z5), изображения полного диска Солнца в линии 195 Å по данным SOHO/EIT (a1, a2, b1, b2, v1, v2, z1, z2) и совмещенные изображения ежедневных данных фотосферных магнитных полей и КД в линии He I 10830 Å обсерватории Китт-Пик (a3, a4, b3, b4, v3, v4, z3, z4). Стрелками указаны даты приведенных ежедневных изображений КД для левых и правых изображений соответственно.

жительной или отрицательной полярности на диске Солнца соответствует топологии ГМП, наблюдаемой в соответствующем КО. Так, КД, соответствующие положительным фотосферным магнитным полям, располагаются в зонах протяженных по широте и долготе структур ГМП той же полярности.

В отличие от зональной, секторная структура ГМП не является устойчивой, а претерпевает резкие изменения, отражающиеся в широтно-долготном перераспределении положительных и отрицательных магнитных полей. На протяжении фазы роста 23-го цикла наблюдается трансформация структуры из четырехсекторной в двухсекторную и обратно. На рисунках 4–6 приведены справа синоптические карты ГМП и слева совмещенные карты фотосферных магнитных полей и КД для последовательных КО в период доминирования секторной структуры ГМП. Начиная с КО 1932 формируется четкая четырехсекторная структура ГМП (рис. 4). На долготах примерно от 60° до 180° и 330°–360° доминируют магнитные поля отрицательной полярности, на долготах 0°–60° и 180°–330° – положительной. Претерпевая незначительные изменения, эта структура ГМП остается приблизительно одной и той же в КО 1933. В КО 1934–1936 зона доминирования положительных магнитных полей резко смещается от долгот 180°–330° к долготам 120°–240°, но, в целом, топология ГМП остается той же. Расположение КД однозначно соответствует распределению ГМП и следует за его изменениями. Следует обратить внимание на формирование КД в области положительного ГМП (~180° долготы и ~40° широты, южного полушария). С КО 1937 начинается перераспределение положительных и отрицательных магнитных полей по широте. В КО 1937 структура ГМП на короткое время становится двухсекторной. В КО 1938–1949 наблюдаются довольно значительные изменения топологии магнитного поля, хотя общая структура ГМП остается четырехсекторной (рис. 4, 5). С КО 1940 по КО 1943 существует довольно устойчивая четырехсекторная структура с доминированием отрицательных магнитных полей на долготах примерно 45°–150° и 270°–340°, а положительных – 0°–45°, 150°–270° и 340°–360°. КД также формируются в зонах отрицательного ГМП только в областях отрицательных фотосферных магнитных полей, а зонах положительного ГМП – только положительных фотосферных магнитных полей. В КО 1944 структура резко трансформируется в двухсекторную. На рисунке 5 показан период с 1943 по 1951 КО, когда произошла эта реорганизация ГМП. На долготах 30°–180° доминируют магнитные поля отрицательной полярности, а на долготах 180°–360° – положительной. На протяжении КО 1945–1948 эта структура становится все более выраженной, а с КО 1949 начинается смещение

зоны доминирования положительных магнитных полей в сторону уменьшения долготы продолжающееся до КО 1952, когда распределение магнитных полей изменяется на противоположное по отношению к существовавшей на протяжении КО 1944–1948. При этом структура все время остается двухсекторной. Изменение распределения КД, соответствующих положительным и отрицательным фотосферным магнитным полям, повторяет динамику ГМП. В КО 1947 на долготах 0°–140° доминировало отрицательное ГМП и КД формируются в областях отрицательных фотосферных магнитных полей, а на долготах 150°–360° – положительные и КД формировались в областях положительных фотосферных магнитных полей. В 1948–1950-м КО произошла реорганизация ГМП, которая сопровождается ростом вклада осесимметричной и симметричной относительно экватора компоненты и снижением осесимметричной, но антисимметричной относительно экватора компоненты, и к КО 1951 распределение магнитных полей ГМП изменилось на противоположное. Также и КД к 1951 КО формируются на долготах 0°–150° в областях положительных фотосферных магнитных полей, а на долготах 160°–360° – отрицательных. В КО 1953 структура ГМП и распределение КД снова резко изменяется и формируется стабильная четырехсекторная структура, существующая до КО 1955 включительно с распределением положительных магнитных полей на долготах приблизительно от 80° до 180° и от 240° до 315°, а отрицательных на долготах 0°–80°, 180°–240° и 315°–360° (рис. 6). Начиная с КО 1956, структура ГМП трансформируется в двухсекторную с образованием отдельных замкнутых структур одной полярности, что характерно для периода максимума солнечной активности, когда единая нейтральная линия магнитного поля, являющаяся основанием гелиосферного токового слоя, формирует сложную топологию в рамках двухсекторной структуры ГМП. Это можно видеть на примере КО 1958, 1959 (рис. 3, рис. 6). Следует отметить, что в периоды резких реорганизаций ГМП площади КД уменьшаются, либо КД не формируются совсем.

Сопоставление изменения зон формирования КД с динамикой локальных магнитных полей активных областей (АО) показало, что для ряда КД, наблюдавшихся в этот период, эти изменения не связаны с появлением или диссипацией конкретных АО. Так, появление ряда высокоширотных КД в областях фотосферных магнитных полей противоположного знаку поля соответствующего полюса, например в КО 1935, 1936, 1945, 1946, не связаны с АО. С ростом активности число АО сильно возрастает и сложно выделить эволюционные изменения КД и АО. Важно отметить, что не зависимо от динамики локальных полей АО, КД формируются в зонах одной полярности фото-

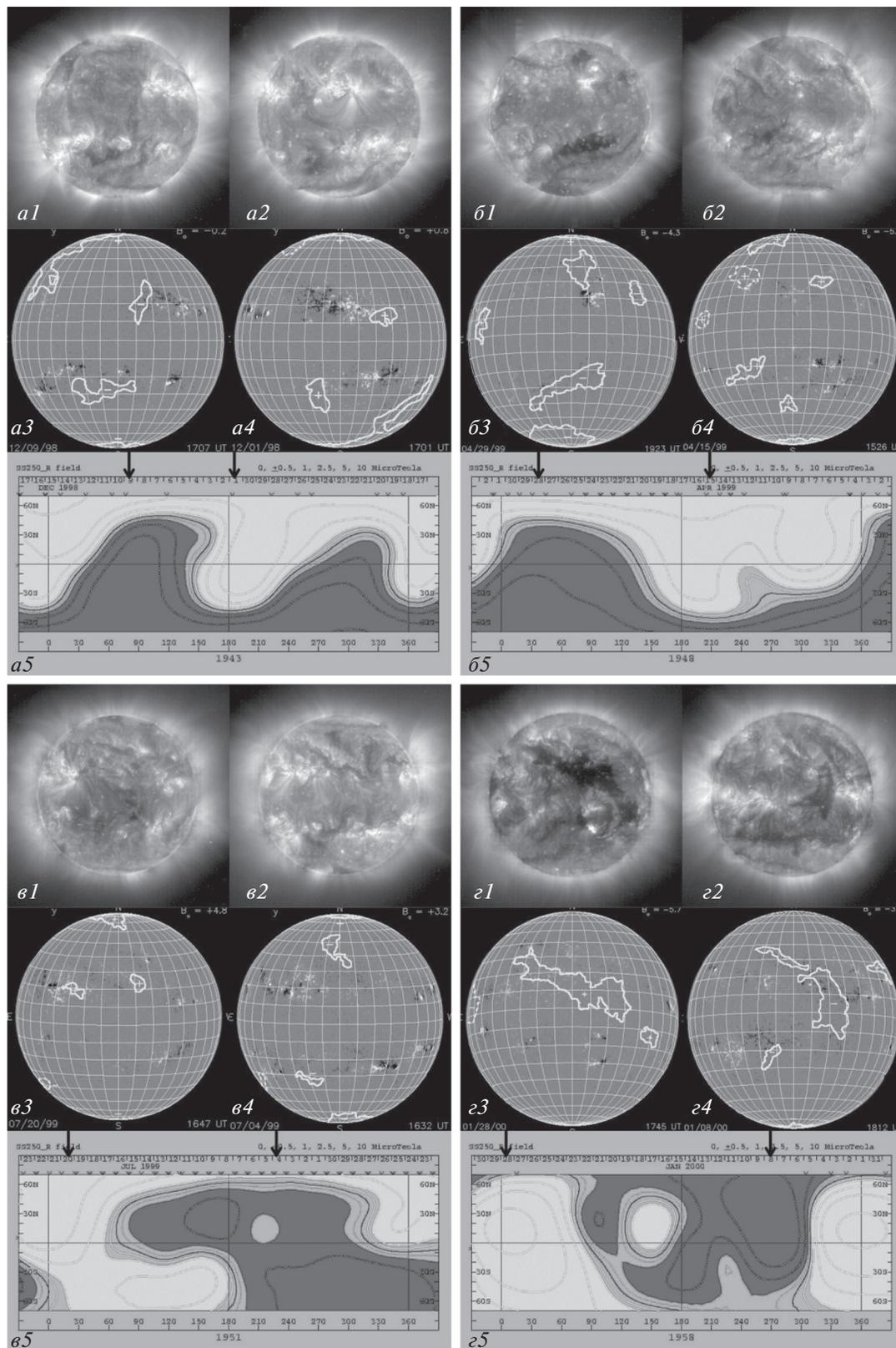


Рис. 3. Примеры секторной структуры ГМП для КО 1943, 1948, 1951 и 1958. Расположение изображений и их обозначения идентичны приведенным к рис. 2.

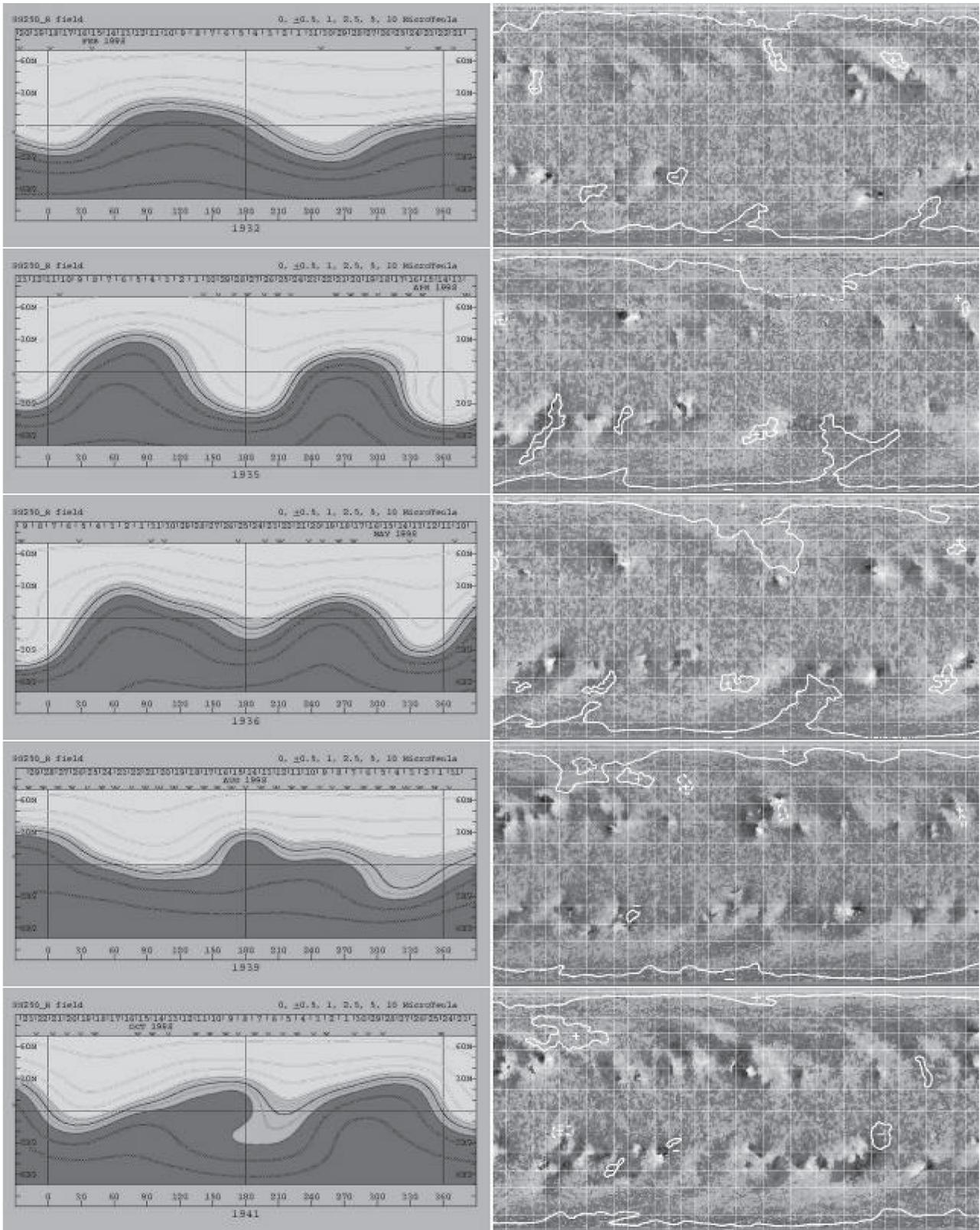


Рис. 4. Динамика секторной структуры ГМП, КО 1932–1941. Слева – распределения ГМП на поверхности источника, справа – КД, наложенные на фотосферные магнитные поля. Светлые тона обозначают положительные магнитные поля, а темные – отрицательные.

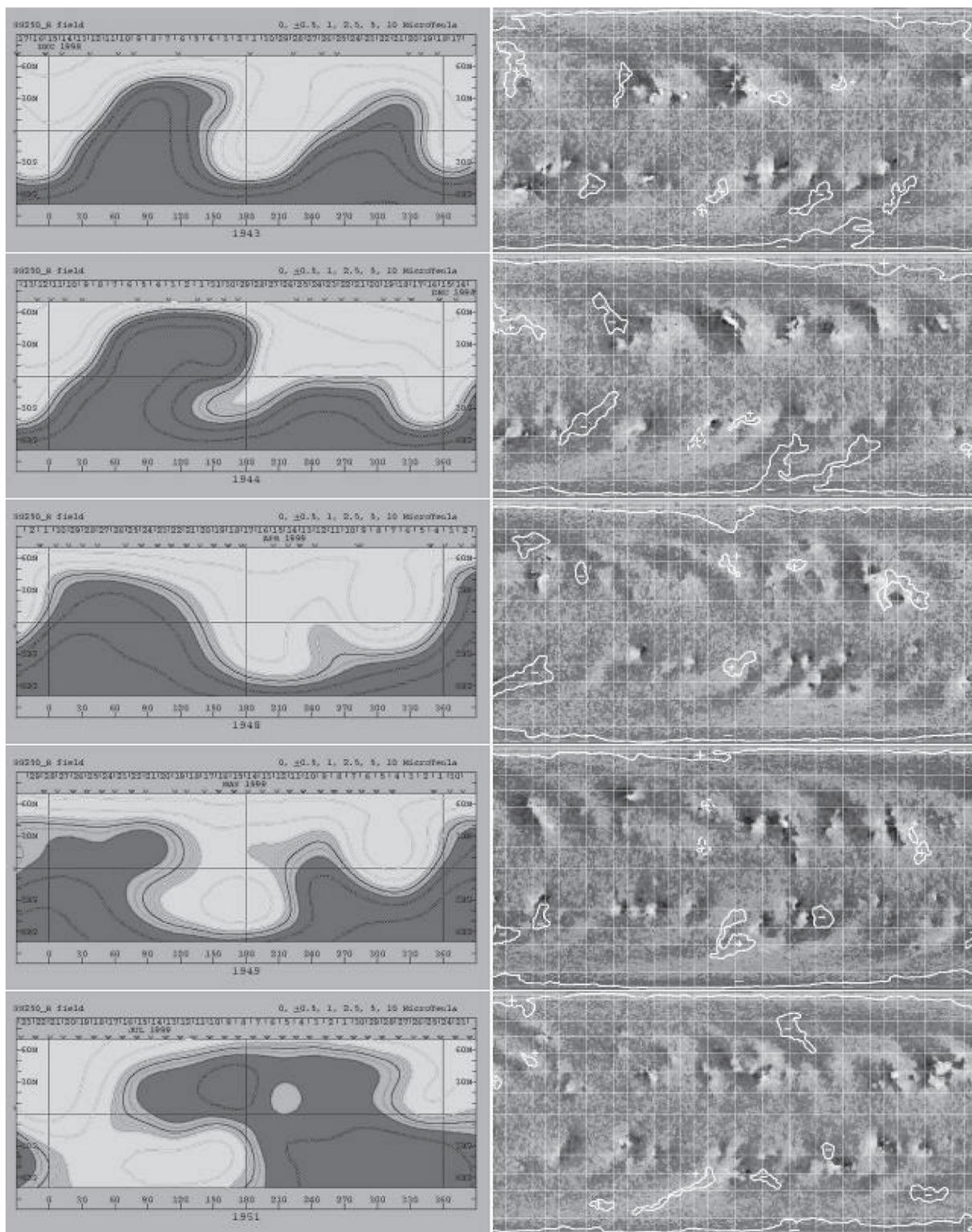


Рис. 5. Динамика секторной структуры ГМП, КО 1943–1951. Описание изображений идентично приведенным к рис. 4.

сферных магнитных полей, соответствующих униполярным зонам ГМП на больших широтно-долготных интервалах, хотя в этих зонах ГМП

есть большие области фотосферных магнитных полей противоположной полярности, но где КД не формируются за все время существования этих

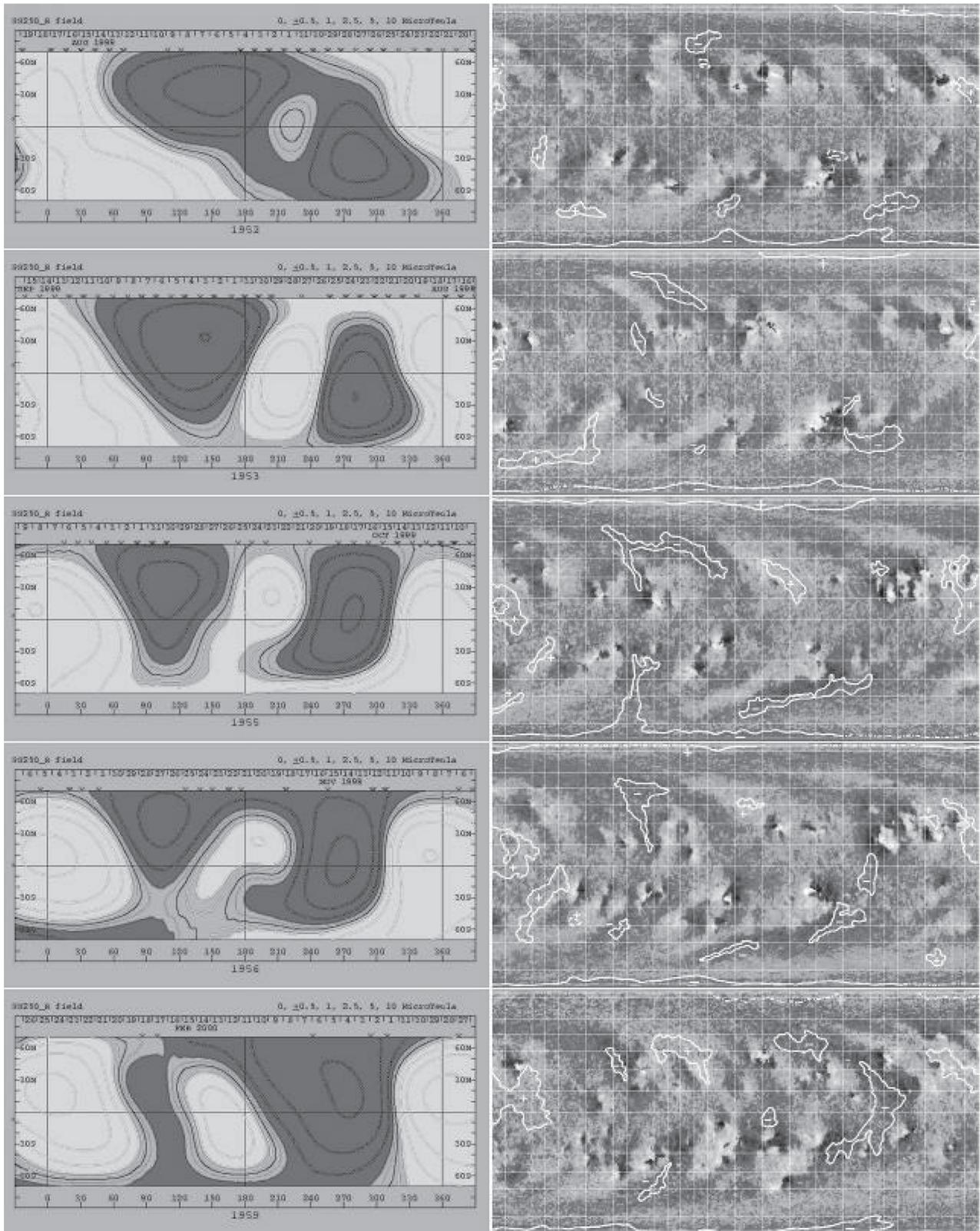


Рис. 6. Динамика секторной структуры ГМП, КО 1952–1959. Описание изображений идентичны приведенным к рис. 4.

областей. Из проведенного исследования следует, что закономерности формирования КД определяются эволюцией ГМП.

5. ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены зависимости динамики КД от эволюционных изменений структуры ГМП на фазе роста 23-го цикла с 01.01.1997 г. по 01.03.2000 г. (КО 1918–2059).

Показано, что на фазе роста солнечной активности в 23-м цикле происходит переход от зональной к секторной структуре ГМП. Зональная структура является квазистабильной. Сумма зональных гармоник доминирует до КО 1941, хотя с КО 1932 формируется устойчивая четырехсекторная структура ГМП. В КО 1941–1950 вклад зональных и секторных компонент становится примерно одинаков, а с КО 1950 доминирует секторная структура ГМП.

Секторная структура ГМП претерпевает резкие изменения от четырехсекторной в начале роста секторных гармоник к двухсекторной, затем снова к четырехсекторной и далее опять к двухсекторной. КД однозначно трассируют все эволюционные изменения ГМП и ее реорганизации от зональной структуры к секторной и дальнейшие топологические изменения секторной структуры ГМП. Широко-долготное распределение КД однозначно соответствует широко-долготному распределению ГМП. В то время как значительные площади фотосферных магнитных полей, расположенные поблизости от КД, расположенных в областях фотосферных магнитных полей со знаком, соответствующим знаку ГМП, могут иметь полярность, противоположную полярности ГМП для этой зоны, КД на них не формируются.

При реорганизации структуры ГМП площади КД уменьшаются, либо КД, в эти периоды, не формируются совсем.

Поскольку эволюция ГМП и, соответственно КД, носят циклический характер, то полученные результаты могут представлять интерес для целей прогнозирования космической погоды и геомагнитной активности.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Данные Wilcox Solar Observatory, используемые в настоящем исследовании, получены с веб сайта: (<http://wsd.stanford.edu>) в 2018:03:11 01:13:34 PST благодаря Ж.Т. Хоексема. В настоящее время работа Wilcox Solar Observatory поддерживается NASA. Данные обсерватории NSO/Kitt Peak, используемые в этой работе, были получены совместно NSF/NOAO, NASA/GSFC и NOAA/SEL. Были использованы данные SOHO/EIT.

SOHO – это совместный интернациональный проект между ESA и NASA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердичевская В.С. Глобальное магнитное поле Солнца и цикл солнечной активности // *Астрон. журн.* Т. 64. С. 835–839. 1987.
- Altschuler M.D., Newkirk G.Jr. Magnetic fields and the structure of the solar corona // *Solar Phys.* V. 9. P. 131–149. 1969.
- Altschuler M.D., Trotter D.E., Newkirk G.Jr., Howard R. Tabulation of the harmonic coefficients of the solar magnetic fields // *Solar Phys.* V. 41. P. 225–226. 1975.
- Altschuler M.D., Levine R.H., Stix M., Harvey J. High resolution mapping of the magnetic field of the solar corona // *Solar Phys.* V. 51. P. 345–375. 1977.
- Bilenko I.A. Coronal holes and the solar polar field reversal // *Astron. Astrophys.* V. 396. P. 657–666. 2002.
- Bilenko I.A. Identification of the sources of the high-speed and low-speed streams of the solar wind // *Int. J. Geomagn. Aeron.* V. 6. G11009. P. 1–10. 2005.
- Bilenko I.A. Influence of the solar global magnetic-field structure evolution on CMEs // *Solar Phys.* V. 289. P. 4209–4237. 2014.
- Bilenko I.A., Tavastsherna K.S. Coronal hole and solar global magnetic field evolution in 1976–2012 // *Solar Phys.* V. 291. P. 2329–2352. 2016.
- Bilenko I.A., Tavastsherna K.S. Coronal holes as tracers of the Sun's global magnetic field in cycles 21–23 of solar activity // *Geomagn. Aeron.* V. 57. № 7. P. 803–813. 2017.
- Bohlin J.D. Extreme-ultraviolet observations of coronal holes. I – Locations, sizes and evolution of coronal holes, June 1973–January 1974 // *Solar Phys.* V. 51. P. 377–398. 1977.
- Chapman S., Bartels J. *Geomagnetism.* V. 2. Oxford. 1050 p. 1940.
- Harvey J.W., Sheeley N.R., Jr. Coronal holes and solar magnetic fields // *Space Sci. Rev.* V. 23. P. 139–158. 1979.
- Harvey K.L., Sheeley N.R., Jr., Harvey J.W. Magnetic measurements of coronal holes during 1975–1980 // *Solar Phys.* V. 79. P. 149–160. 1982.
- Harvey K.L., Recely F. Polar coronal holes during cycles 22 and 23 // *Solar Phys.* V. 211. P. 31–52. 2002.
- Hoeksema J.T., Scherrer P.H. An atlas of photospheric magnetic field observations and computed coronal magnetic fields: 1976–1985 // *Solar Phys.* V. 105. P. 205–211. 1986.
- Ikhsanov R.N., Ivanov V.G. Properties of space and time distribution of solar coronal holes // *Solar Phys.* V. 188. P. 245–258. 1999.
- Insley J.W., Moore V., Harrison R.A. The differential rotation of the corona as indicated by coronal holes // *Solar Phys.* V. 160. P. 1–18. 1995.
- Ivanov E.V., Obridko V.N. Role of the large-scale solar magnetic field structure in the global organization of solar activity // *Geomagn. Aeron.* V. 54. № 8. P. 996–999. 2014.
- Kahler S.W., Davis J.M., Harvey J.W. Comparison of coronal holes observed in soft X-ray and He I 10830 Å spectroheliograms // *Solar Phys.* V. 87. P. 47–56. 1983.

- *Levine R.H.* Evolution of photospheric magnetic field patterns during SKYLAB // *Solar Phys.* V. 54. P. 327–341. 1977.
- *McIntosh P.S.* Patterns and dynamics of solar magnetic fields and He I coronal holes in cycle 23 // *International Solar Cycle Studies Symposium SP–535, ESA.* P. 807–818. 2003.
- *Mogilevsky E.I., Obridko V.N., Shilova N.S.* Large-scale magnetic field structures and coronal holes on the Sun // *Solar Phys.* V. 176. P. 107–121. 1997.
- *Nolte J.T., Krieger A.S., Timothy A.F., Gold R.E., Roelof E.C., Vaiana G., Lazarus A.J., Sullivan J.D., McIntosh P.S.* Coronal holes as sources of solar wind // *Solar Phys.* V. 46. P. 303–322. 1976.
- *Obridko V.N., Shelting B.D.* Coronal holes as indicators of large-scale magnetic fields in the corona // *Solar Phys.* V. 124. P. 73–80. 1989.
- *Sanchez-Ibarra A., Barraza-Paredes M.* Catalog of coronal holes, 1970–1991, Report UAG–102, Boulder: World Data Center A for solar-terrestrial physics, National Geophysical Data Center, 1992.
- *Schatten K.H., Wilcox J.M., Ness N.F.* A model of interplanetary and coronal magnetic fields // *Solar Phys.* V. 6. P. 442–455. 1969.
- *Sheeley N.R., Harvey J.W.* Coronal holes, solar wind streams, and geomagnetic disturbances during 1978 and 1979 // *Solar Phys.* V. 70. P. 237–249. 1981.
- *Stix M.* Coronal holes and the large-scale solar magnetic field // *Astron. Astrophys.* V. 59. P. 73–78. 1977.
- *Temmer M., Vrsnak B., Veronig A.M.* Periodic appearance of coronal holes and the related variation of solar wind parameters // *Solar Phys.* V. 241. P. 371–383. 2007.
- *Timothy A.F., Krieger A.S., Vaiana G.S.* The structure and evolution of coronal holes // *Solar Phys.* V. 42. P. 135–156. 1975.
- *Varsik J.R., Wilson P.R., Li Y.* High-resolution studies of the solar polar magnetic fields // *Solar Phys.* V. 184. P. 223–237. 1999.